

**Диха О.В.,
Посонський С.Ф.,
Бабак О.П.**

Хмельницький національний університет, м.
Хмельницький, Україна
E-mail: tribosenator@gmail.com

ОБЕРНЕНА ЗНОСОКОНТАКТНА ЗАДАЧА ДЛЯ ЦИЛІНДРИЧНОЇ НАПРЯМНОЇ КОВЗАННЯ

УДК 621.891

Представлені результати розв'язку оберненої зносоконтактної задачі для циліндричної напрямної ковзання. Запропоновані експериментальні та розрахункові залежності визначення контактних параметрів для внутрішнього контакту циліндрів близьких радіусів. Отримані розрахункові залежності для коефіцієнтів зносостійкості з використанням апроксимуючих аналогів нелінійних функцій. Наведені приклади практичної реалізації розроблених в роботі методик.

Ключові слова: циліндричні напрямні ковзання, кут контакту, інтенсивність зношування, випробування на знос

Вступ. Постановка завдань

Метою розв'язку прямих зносоконтактних задач є отримання розрахункових залежностей для визначення інтенсивності зношування деталей трибосистем в залежності від шляху тертя при заданих коефіцієнтах зносостійкості, отриманих в більшості випадків експериментальним шляхом. Обернені зносоконтактні задачі мають за мету розробку розрахунково-експериментального алгоритму розрахунку коефіцієнтів зносостійкості за результатами трибологічних випробувань. При цьому для забезпечення статистичних умов потрібно проводити досить велику кількість випробувань зразків із змінними умовами по навантаженнях, швидкостях ковзання та температурі. Для зменшення обсягу випробувань використовують схеми трибоконтакту зразків із змінною площадкою контакту в процесі зношування: кулька-площина, циліндр-площина, кулька-кулька, перехресні циліндри та інші [1-4]. В результаті, отримані залежності розмірів площадки зносу (контакту) від шляху тертя, дають необхідний для побудови апроксимуючих моделей масив даних контактних та інших параметрів трибосистеми. Основними складностями при розв'язку обернених зносоконтактних задач є побудова необхідної системи інтегро-диференціальних рівнянь, яка часто вміщує нелінійні функціональні залежності. Зокрема, це відноситься до циліндричних спряжень із внутрішнім контактом циліндрів близьких радіусів. В даній роботі на основі запропонованих експериментальних методик та використання апроксимуючих аналогів складних функціональних залежностей проведений розв'язок оберненої зносоконтактної задачі для циліндричної напрямної ковзання.

Розрахункова схема. Геометрія контакту і навантаження

Циліндричні напрямні технологічних машин за своєю конструкцією представляють внутрішній контакт двох циліндрів близьких радіусів із радіальним зазором Δ (рис. 1). Циліндрична напрямна 1 знаходиться під дією робочого навантаження Q і здійснює зворотно-поступальні рухи із швидкістю ковзання V . Втулка 2 шириною B є опорою для напрямної та сприймає від неї робоче навантаження. В процесі силової взаємодії втулки і напрямної в місці контакту двох циліндрів виникає контактний тиск σ , розподілений по дузі контакту $2\varphi_0$. Приймаючи зносостійкість напрямної значно вищою за зносостійкість втулки (пряма пара тертя) в процесі експлуатації на внутрішній поверхні втулки буде випрацьовуватись ділянка зносу (на рис. 1-заштрихована зона) з максимальним зносом по центру контакту $u_{\text{ш}}$.

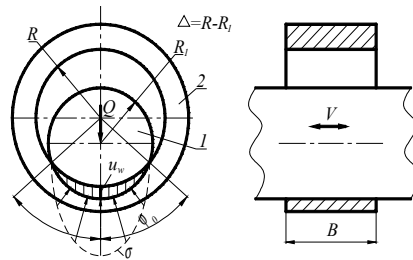


Рис. 1 – Розрахункова схема циліндричної напрямної ковзання

Модель зношування

Для опису процесу зношування використовують математичні форми закономірностей зношування. Закономірність зношування встановлюється експериментально та апроксимується деякими функціями. Найбільшого розповсюдження отримало подання експериментальних закономірностей у вигляді залежності інтенсивності зношування від різних параметрів (контактного тиску, швидкості ковзання, температури). Для визначення параметрів закономірності зношування проводять випробування зразків із змінною площадкою контакту у процесі зношування. Під час випробувань на зношування періодично або безперервно вимірюються розміри зношеної площадки контакту відповідно до шляху тертя. За результатами випробувань будуватиметься апроксимуюча функція та для визначення числового значення параметрів моделі зношування розв'язується обернена зносоконтактна задача для контактування тіл відповідної конфігурації.

Для оцінки зношування циліндричного спряження втулка-напрямна приймемо модель у вигляді залежності інтенсивності зношування I від визначальних факторів у вигляді:

$$I = \frac{du_w}{dS} = c_w \left(\frac{f\sigma}{H_\mu} \right)^n, \quad (1)$$

де u_w – максимальне лінійне зношування втулки в центрі площадки контакту, м;

S – шлях тертя для конуса, м;

f – коефіцієнт тертя;

σ – середній тиск у контактній втулці, МПа;

H_μ – мікротвердість зміцнених ділянок, МПа;

c_w, n – параметри зношування.

Для визначення середнього контактного тиску між валом і втулкою скористаємось відомою залежністю для такого типу циліндричних спряжень:

$$\sigma = \frac{Q}{2bR\phi_0}, \quad (2)$$

де Q – зовнішнє навантаження, Н;

b – ширина контакту втулки і напрямної, мм;

R – внутрішній радіус втулки, мм;

ϕ_0 – напівкут контакту валу і втулки, МПа.

Зв'язок максимального зносу u_w і кута контакту ϕ_0 визначається з геометрії внутрішнього контакту двох циліндрів із радіальним початковим зазором Δ за залежністю:

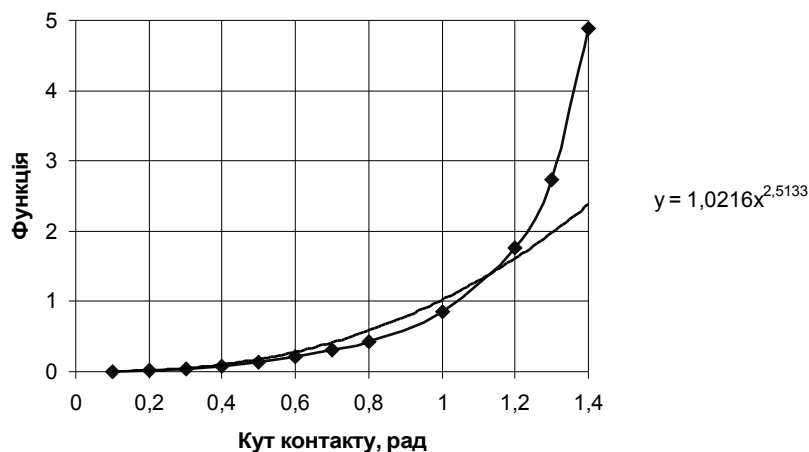
$$u_w(\phi_0) = \Delta (\sec \phi_0 - 1). \quad (3)$$

Для подальшого використання функцію $\sec \varphi_0 - 1$ зручно представити у вигляді степеневі апроксимації. Для діапазону зміни кута контакту $\varphi_0 = 0 \dots \frac{\pi}{2}$ (табл. 1) за допомогою програми Excel побудуємо графічну залежність функції $\sec \varphi_0 - 1$ від кута контакту φ_0 (рис. 2) та отримаємо її степеневу апроксимацію.

Таблиця 1

Чисельні залежності для функції кута контакту φ_0

φ_0 , рад	0,2	0,4	0,6	0,8	1,0	1,2	1,4
$\sec \varphi_0 - 1$	0,02	0,086	0,212	0,435	0,851	1,76	4,88

Рис. 2 - Степеневі апроксимація функції $\sec \varphi_0 - 1$ від кута контакту φ_0

Наближено приймемо:

$$\sec \varphi_0 - 1 \approx \varphi_0^{2,5} \quad (4)$$

Тобто вираз для максимального зносу від кута контакту набуде вигляду:

$$u_w(\varphi_0) = \Delta \varphi_0^{2,5}. \quad (5)$$

В результаті проведення випробувань на зношування спряження втулка-напрямна встановимо залежність напівкута контакту φ_0 шляху тертя S у вигляді:

$$\varphi_0(S) = \alpha S^\beta, \quad (6)$$

де α , β – параметри апроксимації, які визначаються за наслідками випробувань.

Значення кута контакту у спряженні вал-втулка визначали за допомогою методу електроконтактного копіювання.

Інтегруючи вираз (1), отримаємо інтегральну форму закономірності зношування внутрішньої поверхні втулки:

$$u_w(S) = \int_0^S c_w \left(\frac{f\sigma(S)}{H_\mu} \right)^n dS. \quad (7)$$

або після перетворень:

$$u_W(S) = c_W \left(\frac{f}{H_\mu} \right)^n \int_0^S \sigma(S)^n dS. \quad (8)$$

Підставляючи в ліву частину отриманого рівняння вираз (5) для зносу через кут контакту, а в праву – вираз (2) для контактного тиску, отримуємо:

$$\Delta \varphi_0^{2,5}(S) = c_W \left(\frac{f}{H_\mu} \right)^n \int_0^S \left(\frac{Q}{2bR\varphi_0(S)} \right)^n dS \quad (9)$$

або, з урахуванням виразу (6), після інтегрування по шляху тертя отримуємо:

$$\alpha^{2,5} S^{2,5\beta} \Delta = c_W \left(\frac{fQ}{2\alpha bRH_\mu} \right)^n \frac{S^{1-\beta n}}{1-\beta n}. \quad (10)$$

З умови виконуваності рівняння (10) при будь-яких S слідує:

$$2,5\beta = 1 - \beta n, \quad (11)$$

звідки:

$$\boxed{n = \frac{1 - 2,5\beta}{\beta}}. \quad (12)$$

Параметр зношування c_W визначимо із залежності (10):

$$\boxed{c_W = 2,5\alpha^{n+2,5}\Delta\beta \left(\frac{2bRH_\mu}{fQ} \right)^n}. \quad (13)$$

Вимірювання кута контакту φ_0

Вимірювання кута контакту циліндричної напрямної і суцільної втулки має певні труднощі, пов'язані із закритістю зони контакту для візуального огляду для непрозорих металевих матеріалів валу і втулки. Після розбирання спряження та спробі виміряти кут контакту по сліду доріжки зносу на внутрішній поверхні втулки також ускладнено при невеликих діаметрах втулки та не забезпечить потрібної точності вимірювань. Для вирішення даної проблеми пропонується спосіб вимірювання кута контакту при внутрішньому контакті двох металевих циліндрів способом електроконтактного копіювання. Схема вимірювань показана на рис. 3. В радіальний отвір циліндричної напрямної (валу) 1 встановлений струмопровідний штифт 2, який ізолюваний епоксидною смолою від основного металу валу і пришліфований до його зовнішньої поверхні. Штифт 2 електрично з'єднаний з полюсом джерела живлення 3 постійного або змінного струму малої напруги (6...12 В). Другий полюс джерела живлення під'єднаний до струмопровідної втулки 4. В утворений електричний ланцюг ввімкнутий спеціальний електронний ВТК прилад для вимірювання тривалості електричного контакту.

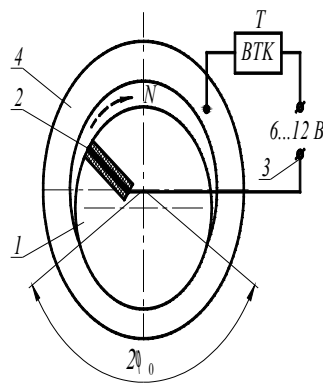


Рис. 3 – Схема вимірювання тривалості дуги контакту в циліндричному спряженні

Прилад розроблений в Хмельницькому національному університеті і дозволяє при замиканні-розмиканні контакту на індикаторах фіксувати тривалість електричного контакту з точністю до тисячної долі секунди. Процедура вимірювання кута контакту наступна. Через задані проміжки часу (в процесі зношування) із встановленою швидкістю N (об/с) вал провертають у втулці. В період входження штифта 2 (рис. 3) в електричний контакт із втулкою електричний ланцюг замикається і прилад ВТК починає відліковувати час тривалості T проходження штифта по втулці до моменту виходу із контакту. Таким чином, кут контакту в даному циліндричному спряженні може бути визначений за залежністю:

$$2\varphi_0 = 2\pi TN. \quad (14)$$

Вимірювання кута контакту може бути проведено в будь-який період зношування і для статистичного представництва необхідну кількість повторювань.

Якщо в процесі випробувань як зразки використовувати розрізні втулки (рис. 4) то є можливість визначення величини дуги контакту (зносу) φ_0 за результатами вимірювань величини максимального зносу u_w . Значення кута контакту через величину лінійного зношування u_w можна визначити із виразу (3):

$$\varphi_0 = \arccos\left(\frac{\Delta}{u_w + \Delta}\right). \quad (15)$$

Для вимірювання u_w скористаємося методом штучних баз. Для цього, використовуючи прилад для вимірювання твердості по Роквеллу та спеціальні призми для фіксації зразка, на останньому виконуємо вдавлювання конуса (рис. 5). Кут конуса складає 120° . На внутрішній частині сектора кільця отримаємо лунку у вигляді конуса з кутом 120° . Розглядаючи прямокутний трикутник із відомими протилежним катетом та кутом, враховуючи тригонометричні залежності визначимо величину зносу u_w за залежністю:

$$u_w = \frac{D_0 - D}{2\text{tg}60^\circ} = \frac{D_0 - D}{3,464} \quad (16)$$

Для вимірювання величини діаметру плями зносу використовується горизонтальний компаратор ИЗА-2.

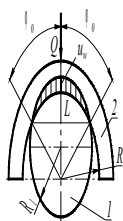


Рис. 4 – Схема для вимірювання лінійного зносу

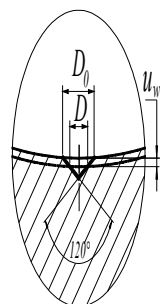


Рис. 5– Вимірювання зносу методом штучних баз

При проведенні випробувань на знос циліндричного спряження за схемою (рис. 3) більш зручно вимірювати довжину хорди дуги зносу L , а потім перерахувати значення кута контакту, що впливає із геометрії контакту за схемою рис. 3 за формулою:

$$\varphi_0 = \arcsin(L / 2R) \quad (17)$$

Результати випробувань та розрахунків

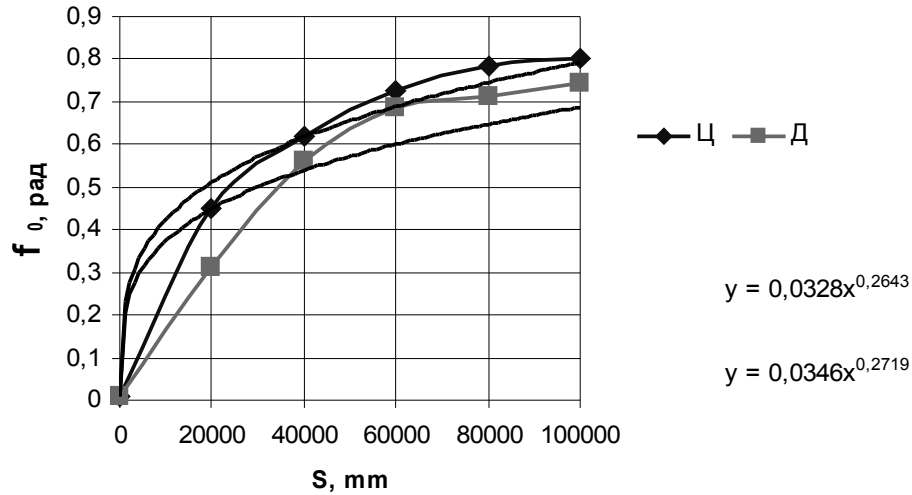
Результати випробувань на зношування циліндричного спряження при зворотно-поступальному русі наведені в таблиці 2. Умови випробувань: матеріал валу-сталь 40X; матеріал втулки – сталь 45 із суцільним цементованим шаром (Ц) та дискретно зміцненою поверхнею (Д) (зміцнена площа -60%); ширина втулки $b = 10$ мм; номінальний радіальний зазор у спряженні 0,1 мм, радіальне навантаження на напрямній $Q = 30$ Н. Знос втулки вимірювався методом штучних баз, а кут контакту розраховувався за залежністю (15).

Таблиця 2

Результати випробувань і розрахунків зносу

Кількість циклів, N	Шлях тертя, $S \times 10^3$, мм	u_w (Ц), мм	φ_0 (Ц), рад	u_w (Д), мм	φ_0 (Д), рад
1000	20	0,011	0,448	0,005	0,310
2000	40	0,023	0,621	0,018	0,560
3000	60	0,034	0,728	0,029	0,684
4000	80	0,041	0,785	0,032	0,711
5000	100	0,044	0,803	0,036	0,745

За допомогою програми Excel була проведена степенева апроксимація отриманих експериментальних залежностей кута контакту від шляху тертя згідно даних таблиці 2 та формули (6). На рис. 6 представлені результати визначення чисельних значень параметрів степеневої апроксимації (6) для двох вище вказаних способів зміцнення.

Рис. 6 – Степенева апроксимація залежності $\varphi_0(S)$

Для реалізації запропонованого алгоритму визначення характеристик зносостійкості C_W , n закономірності зношування (1) використана програма MathCad. Результати визначення характеристик зносостійкості показані в таблиці 3.

Таблиця 3

Результати визначення чисельних значень характеристик зносостійкості закономірності зношування (1)

Суцільне цементоване покриття	$\alpha = 0,0346$	$\beta = 0,2719$	$C_W = 1,031$	$n = 1,179$
Дискретне цементоване покриття	$\alpha = 0,0328$	$\beta = 0,2643$	$C_W = 2,223$	$n = 1,284$

За отриманими значеннями характеристик зносостійкості C_W , n по закономірності (1) розраховані значення інтенсивності зношування в залежності від контактного тиску в діапазоні 2...20 МПа для двох варіантів зміцнення внутрішньої поверхні напрямної втулки. Результати розрахунку показані на рис. 7. Таким чином видно, що збільшення контактної тиску у спряженні призводить до збільшення інтенсивності зношування спряження. Модифікація поверхні втулки дискретною електроконтактною цементацією (Д), як видно із графіку рис. 7, зменшує інтенсивність зношування у всьому діапазоні контактних тисків порівняно із суцільним зміцненням (Ц).

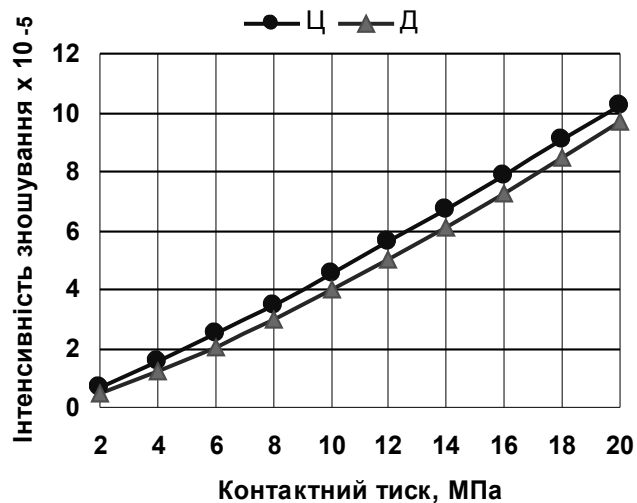


Рис. 6 – Залежність інтенсивності зношування від контактної тиску

Висновок

Запропонований розв'язок оберненої зносоконтактної задачі для циліндричної напрямної ковзання із визначенням характеристик зношування. Отримана розрахунково-експериментальна модель інтенсивності зношування дозволяє аналізувати вплив на зносостійкість циліндричного спряження визначальних факторів тиску, твердості, коефіцієнту тертя з метою їх оптимізації.

Література

1. Кузьменко А. Г. Метод испытаний на износ со смазкой по четырехшариковой схеме (теория износа шаров в ЧШМ) / А. Г. Кузьменко, А. В. Дыха // Проблемы трибологии. – 2000. – № 3. – С. 30–40.
2. Дыха О.В. Теорія та експеримент методу трибологічних випробувань за схемою «циліндру» / О.В. Дыха, В.П. Вельбой // Проблемы трибологии (Problems of Tribology). – 2012. – № 2. – С. 135-138.
3. Dykha O.V. Rated and experimental modeling of tribological properties of constructional and lubricating materials / O.V.Dykha, T.V. Gedzuk // Проблемы трибологии (Problems of Tribology). – 2014. – № 1. – С. 84 – 87.
4. Дыха О.В. Результати випробувань на знос конічних зразків зі сталі 45 в моторній оливі / О.В. Дыха, В.П. Вельбой, Т.В. Гедзюк // Проблемы трибологии (Problems of Tribology). – 2014. – № 2. – С. 111-116.

Надійшла в редакцію 25.11.2014

Dykha O.V., Posonsky S.F., Babak O.P. **Reverse wear contact task for the cylindrical sending sliding**

The presented results of decision of reverse **wear** contact task are for the cylinder sending of sliding. Experimental and calculation dependences of determination of contact parameters are offered for the internal contact of cylinders of near radiuses. Calculation dependences are got for the coefficients of wearproofness with the use of approximating analogues of nonlinear functions. The examples of practical realization of the methods developed in-process are resulted.

Keywords: The cylinder sending sliding, corner of contact, intensity of wear, wear test

References

1. Kuzmenko A. G., Dykha A.V. Metod ispytaniy na iznos so smazkoy po chetyresharikovoy sheme (teoriya iznosa sharov v ChShM). Problemi tribologii. 2000. No 3, PP. 30–40.

2. Diha O.V., Velboy V.P. Teoriya ta eksperiment metodu tribologichnih viprobuvan' za shemoyu «tsilindr-kulya». Problemi tribologii (Problems of Tribology). 2012. No 2, PP. 135-138.
3. Dykha O.V., Gedzuk T.V. Rated and experimental modeling of tribological properties of constructional and lubri-cating materials. Problemi tribologii (Problems of Tribology). 2014. No 1, PP. 84 – 87.
4. Dykha O.V., Velboy V.P., Gedzuk T.V. Rezultati viprobuvan na znos konichnih zrazkiv zi stali 45 v motorniy olivi. Problemi tribologii (Problems of Tribology). 2014. No 2. PP. 111-116.